

Efectos económicos de las sanciones al petróleo ruso: un análisis de equilibrio espacial

Economic effects of Russian oil sanctions: A spatial equilibrium analysis

Jaime Antonio Ruiz Hernández

Universidad Juárez del Estado de Durango

Durango, México

Correo: jaime.ruiz@ujed.mx

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-2689-6952>

Julieta Evangelina Sánchez Cano

Universidad Juárez del Estado de Durango

Durango, México

Correo: julieta.san2009@ujed.mx

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-1735-0483>

Eduardo Alberto Lara Reimers

Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro

Saltillo, México

Correo: agroforestal33@gmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-7321-8129>

Resumen

Las sanciones internacionales al sector energético ruso posteriores a la invasión de Ucrania modificaron las condiciones logísticas, financieras y comerciales del mercado petrolero, generando una reorientación de los flujos de crudo. Este artículo evalúa el efecto de dichas restricciones sobre la asignación espacial del comercio, los precios de equilibrio y el bienestar neto del sistema modelado. Metodológicamente, se formula un modelo de equilibrio espacial de precios para cuatro bloques regionales —Rusia, exportadores alternativos, Europa y Asia—, combinando datos de comercio internacional para 2022 y 2024 con simulaciones de estática comparativa que representan la sanción como una cuña comercial ad valorem aplicada a la ruta Rusia–Europa. Los resultados descriptivos muestran una contracción de 86.5% en el flujo Rusia–Europa, de 94.4 a 12.7 millones de toneladas métricas, y un incremento de 62.1% en el flujo Rusia–Asia, de 123.7 a 200.5 millones de toneladas métricas. En la simulación, la introducción de una cuña positiva genera una solución de esquina que desactiva el comercio directo en la ruta sancionada y reasigna los flujos hacia rutas alternativas. Bajo la especificación base, con costos ordinarios de transporte normalizados en cero, los precios de equilibrio y el bienestar agregado permanecen estables; la prueba de sensibilidad con costos positivos confirma la reasignación espacial, aunque modifica el nivel de bienestar estimado. Se concluye que las sanciones operan como una fricción distributiva cuya efectividad económica depende de su capacidad para limitar el arbitraje logístico, financiero y regulatorio de los agentes.

Palabras clave: sanciones económicas; petróleo ruso; equilibrio espacial; comercio internacional; bienestar económico.



Abstract

International sanctions on the Russian energy sector following the invasion of Ukraine altered the logistical, financial, and trade conditions of the oil market, leading to a reorientation of crude oil flows. This article evaluates the effect of these restrictions on spatial trade allocation, equilibrium prices, and net welfare in the modeled system. Methodologically, a spatial price equilibrium model is formulated for four regional blocs—Russia, alternative exporters, Europe, and Asia—combining international trade data for 2022 and 2024 with comparative static simulations that represent the sanction as an ad valorem trade wedge applied to the Russia–Europe route. The descriptive results show an 86.5% contraction in the Russia–Europe flow, from 94.4 to 12.7 million metric tons, and a 62.1% increase in the Russia–Asia flow, from 123.7 to 200.5 million metric tons. In the simulation, the introduction of a positive wedge generates a corner solution that deactivates direct trade on the sanctioned route and reallocates flows toward alternative routes. Under the baseline specification, with ordinary transportation costs normalized to zero, equilibrium prices and aggregate welfare remain stable; the sensitivity test with positive transportation costs confirms the spatial reallocation pattern, although it changes the estimated welfare level. The article concludes that sanctions operate as a distributive friction whose economic effectiveness depends on their ability to limit the logistical, financial, and regulatory arbitrage of agents.

Keywords: economic sanctions; Russian oil; spatial equilibrium; international trade; economic welfare.

Introducción

Los mercados energéticos globales han sufrido cambios estructurales importantes debido a las sanciones a las exportaciones de petróleo ruso, instauradas tras la invasión de Ucrania en 2022 y ampliadas en 2025. Estas sanciones restringieron el acceso a seguros, financiación y servicios marítimos occidentales, limitando la capacidad de exportación rusa y modificando la distribución geográfica de los flujos de petróleo crudo. Las medidas alteraron el equilibrio entre los principales productores e importadores, generando diferenciales persistentes entre los indicadores de referencia Urals¹ y Brent² y reconfigurando

los patrones del comercio petrolero mundial (Maneejuk, Kaewtathip y Yamaka, 2024; Oglend y Kleppe, 2025). La fragmentación de las rutas comerciales ha incrementado los costos logísticos y la incertidumbre en la formación de precios (Baltodano et al. 2025; Nepal, Deng y Dong, 2025).

La evidencia empírica muestra que los choques geopolíticos afectan directamente a la volatilidad y a los mecanismos de transmisión en los mercados energéticos. Huszár et al. (2023) identifican vínculos estrechos entre los indicadores de riesgo geopolítico y la volatilidad de los precios del petróleo. Nasim et al. (2023) encuentran que los choques en los precios de la energía

influyen en la estabilidad financiera a través de los canales del crédito y del tipo de cambio, mientras que Zhou et al. (2024) demuestran efectos de desbordamiento (*spillovers*) dependientes de cuantiles entre el petróleo y otras materias primas. Maneejuk et al. (2024) analizan el conflicto Rusia-Ucrania y muestran que los episodios de tensión geopolítica generan ajustes asimétricos entre los precios de las energías fósiles y las renovables. Mariev e Islam (2025) documentan además que la incertidumbre geopolítica e institucional afecta al comercio de minerales para la transición energética, lo que sugiere implicaciones más amplias para las cadenas de suministro energético mundiales. De tal manera que, los choques políticos se propagan a través de múltiples canales de transmisión —financieros, comerciales y logísticos—, afectando tanto a la dinámica de precios como a la integración de los mercados.

Con relación a la reasignación comercial y los efectos en el bienestar bajo sanciones, Baltodano et al. (2025) e Islam et al. (2024), se centran en la agrupación de volatilidad (*volatility clustering*) y la conectividad dinámica. El enfoque de equilibrio espacial, desarrollado originalmente por Samuelson

(1952) y formalizado por Takayama y Judge (1971), proporciona una estructura analítica adecuada para estudiar la reasignación de flujos en respuesta a las fricciones comerciales. Este marco se ha aplicado ampliamente en los mercados agrícolas y energéticos para evaluar el impacto de los aranceles, las cuotas y los costos de transporte sobre los diferenciales de precios internacionales y el bienestar (Labys, 1973; Devadoss y Ridley, 2014). Bajo este enfoque, las sanciones pueden interpretarse como un costo de exportación o una restricción cuantitativa que afecta al equilibrio entre regiones.

Este artículo aplica un modelo de equilibrio espacial para examinar cómo las sanciones al petróleo ruso modifican los patrones comerciales, los precios y el bienestar en cuatro bloques regionales del mercado petrolero internacional. El modelo considera cuatro bloques representativos: (i) Rusia, (ii) exportadores alternativos, (iii) Europa como región importadora afectada por las sanciones y (iv) Asia como bloque importador alternativo. En este marco, las sanciones se modelan como un costo de exportación *ad valorem* impuesto al crudo ruso, lo que aumenta efectivamente el costo

marginal de abastecer a los mercados extranjeros. Esta restricción exógena reduce la capacidad de Rusia para competir en los mercados internacionales y altera las condiciones de equilibrio del mercado mundial. El estudio se centra en cómo las restricciones de oferta y las asimetrías de costos configuran la formación de precios internacionales y la reasignación de los flujos comerciales entre los exportadores.

Por lo anterior, el objetivo de este artículo es analizar los efectos económicos de las sanciones al petróleo ruso sobre los precios internacionales, la reasignación de flujos comerciales y el bienestar de los agentes participantes en el mercado mundial del petróleo, mediante un modelo de equilibrio espacial. La pregunta que guía la investigación es la siguiente: ¿cómo modifican las sanciones al petróleo ruso las condiciones de equilibrio del mercado internacional, los patrones de comercio y la distribución del bienestar entre Rusia, los exportadores alternativos y los países importadores? Como hipótesis de trabajo, se plantea que las sanciones funcionan como una fricción comercial exógena que incrementa los costos efectivos de exportación del crudo ruso y modifica la

asignación espacial del comercio petrolero internacional.

Materiales y métodos

Diseño metodológico

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, mediante un modelo de equilibrio espacial aplicado al mercado internacional del petróleo crudo. El análisis se fundamenta en la teoría de equilibrio espacial propuesta por Samuelson (1952) y formalizada por Takayama y Judge (1971), la cual permite examinar la interacción entre regiones exportadoras e importadoras mediante relaciones de oferta, demanda y costos de comercio. Este enfoque ha sido utilizado en el estudio de mercados internacionales de *commodities* para evaluar los efectos de restricciones comerciales, costos de transporte y políticas comerciales sobre los flujos de comercio, los precios relativos y el bienestar económico (Labys, 1973; Devadoss y Ridley, 2014).

El modelo considera cuatro bloques representativos del mercado petrolero internacional. El primero corresponde a Rusia, definida como exportador sujeto a sanciones. El segundo agrupa a los exportadores alternativos con participación

relevante en el abastecimiento europeo, principalmente Estados Unidos, Noruega, Kazajistán, Arabia Saudita, Irak, Libia y Emiratos Árabes Unidos. El tercero corresponde a Europa, considerada como región importadora directamente expuesta a la sustitución del crudo ruso. El cuarto corresponde a Asia, entendido como bloque importador alternativo, integrado principalmente por China, India y economías de Asia del Sur y Central³. La delimitación regional se realizó a partir de la evolución observada en los flujos internacionales de petróleo crudo entre 2022 y 2024, con información de Resource Trade Earth (2026). Las sanciones al petróleo ruso se incorporaron como una fricción comercial exógena, representada mediante un costo de exportación *ad valorem* aplicado principalmente a los flujos de petróleo ruso hacia Europa. Esta especificación no supone una decisión interna de política comercial por parte de Rusia, sino una restricción externa que eleva los costos efectivos de colocar crudo ruso en determinados mercados. Bajo esta estructura, el modelo permite evaluar cómo la fricción sancionatoria modifica la asignación espacial de los flujos entre regiones exportadoras e importadoras.

La estrategia analítica se desarrolló mediante simulaciones de estática comparativa. Para ello, se construyó un escenario base sin fricciones adicionales asociadas a sanciones y, posteriormente, se incorporaron escenarios alternativos con distintos niveles de fricción comercial sobre el flujo de petróleo ruso hacia Europa. La comparación entre escenarios permite identificar cambios en la asignación espacial de los flujos comerciales, en los precios de equilibrio y en el bienestar del sistema modelado. Este tipo de simulación permite representar el efecto de restricciones comerciales exógenas sobre las condiciones de arbitraje entre regiones, de acuerdo con la lógica del equilibrio espacial (Takayama y Judge, 1971; Devadoss y Ridley, 2014).

El estudio incorpora un análisis de bienestar económico basado en la comparación entre el escenario base y los escenarios con fricción sancionatoria. El análisis se centra en los efectos de dicha fricción sobre la reasignación de flujos entre Rusia, exportadores alternativos, Europa y Asia, así como en las variaciones resultantes en precios de equilibrio y bienestar agregado. Bajo esta especificación, las sanciones se evalúan como una restricción comercial que

modifica los costos relativos de acceso entre rutas, sin asumir que dicha fricción constituye un ingreso fiscal para la región importadora.

Modelo teórico de equilibrio espacial

El modelo teórico utiliza un marco de equilibrio espacial de cuatro bloques regionales. Se consideran Rusia (R), los exportadores alternativos (E), Europa (EU) y Asia (A). Rusia representa al exportador sujeto a sanciones; los exportadores alternativos agrupan a los principales proveedores que sustituyen parcialmente al crudo ruso en el mercado europeo; Europa representa la región importadora directamente expuesta a las restricciones comerciales sobre el petróleo ruso; y Asia representa el bloque importador alternativo que absorbe una parte relevante de los flujos redirigidos desde Rusia.

Sea el conjunto de regiones:

$$J = \{R, E, EU, A\}$$

Para cada región $i \in J$, la demanda doméstica de petróleo crudo se define como:

$$D_i = D_i(P_i, Y_i), i = R, E, EU, A \quad (1)$$

y la oferta doméstica como:

$$S_i = S_i(P_i, Z_i), i = R, E, EU, A \quad (2)$$

donde D_i representa la cantidad demandada,

S_i la cantidad ofrecida, P_i el precio doméstico del petróleo crudo, Y_i los desplazadores de la demanda —como ingreso, actividad económica o consumo energético— y Z_i los desplazadores de la oferta —como costos de extracción, capacidad productiva, disponibilidad logística y condiciones regulatorias—.

Para la formulación operativa⁴ del modelo se utilizan funciones inversas de demanda y oferta lineales:

$$p_i^d = a_i - b_i y_i, \quad b_i > 0, \quad i = R, E, EU, A \quad (3)$$

$$p_i^s = c_i + d_i x_i, \quad d_i > 0, \quad i = R, E, EU, A \quad (4)$$

donde p_i^d es el precio inverso de demanda de la región i , p_i^s es el precio inverso de oferta, y_i es la cantidad consumida, x_i es la cantidad producida, a_i y c_i son interceptos, y b_i y d_i representan las pendientes de demanda y oferta, respectivamente. Bajo esta especificación, la demanda tiene pendiente negativa y la oferta pendiente positiva.

Los flujos comerciales bilaterales se representan mediante x_{ij} , donde i identifica la región de origen y j la región de destino⁵. Dado el objetivo del estudio, los flujos internacionales principales son:

$$x_{R,EU}, x_{R,A}, x_{E,EU}, x_{E,A} \quad (5)$$

donde $x_{R,EU}$ representa las exportaciones rusas hacia Europa, $x_{R,A}$ las exportaciones rusas hacia Asia, $x_{E,EU}$ las exportaciones de proveedores alternativos hacia Europa y $x_{E,A}$ las exportaciones de proveedores alternativos hacia Asia. De manera general, el modelo permite incluir flujos domésticos x_{ii} , los cuales representan el consumo abastecido por producción interna en cada región.

Los costos de transporte y comercialización entre regiones se representan por t_{ij} , con:

$$t_{ij} \geq 0, \quad i, j \in \mathcal{J} \quad (6)$$

Además, se incorpora una cuña comercial (*trade wedge*) τ_{ij} , interpretada como un costo equivalente asociado a sanciones, restricciones financieras, costos de cumplimiento normativo, seguros, financiamiento, riesgo logístico o limitaciones operativas (Crozet y Hinz, 2020). En el caso analizado, la sanción principal se ubica en el flujo de petróleo ruso hacia Europa, por lo que:

$$\tau_{R,EU} > 0 \quad (7)$$

mientras que, para los demás flujos internacionales, puede asumirse inicialmente:

$$\tau_{R,A} = 0, \tau_{E,EU} = 0, \tau_{E,A} = 0 \quad (8)$$

Esta especificación no implica ausencia de costos de transporte o logística en los demás

vínculos comerciales, sino que distingue entre los costos ordinarios de comercio (t_{ij}) y la cuña adicional asociada a sanciones (τ_{ij}).

Las condiciones de arbitraje espacial establecen que el precio de demanda en la región de destino no puede exceder el precio de oferta en la región de origen, ajustado por costos de transporte y por la cuña comercial correspondiente (Samuelson, 1952; Takayama y Judge, 1971). De forma general:

$$\rho_j^d \leq (1 + \tau_{ij})(\rho_i^s + t_{ij}), \quad i, j \in \mathcal{J} \quad (9)$$

donde ρ_j^d representa el precio de mercado de demanda en la región j , y ρ_i^s el precio de mercado de oferta en la región i . Cuando existe comercio positivo entre i y j , es decir, cuando $x_{ij} > 0$, la condición de arbitraje se cumple con igualdad:

$$\rho_j^d = (1 + \tau_{ij})(\rho_i^s + t_{ij}) \quad \text{si } x_{ij} > 0 \quad (10)$$

Por tanto, para los principales vínculos del modelo se tiene:

$$\rho_{EU}^d \leq (1 + \tau_{R,EU})(\rho_R^s + t_{R,EU}) \quad (11)$$

$$\rho_A^d \leq (1 + \tau_{R,A})(\rho_R^s + t_{R,A}) \quad (12)$$

$$\rho_{EU}^d \leq (1 + \tau_{E,EU})(\rho_E^s + t_{E,EU}) \quad (13)$$

$$\rho_A^d \leq (1 + \tau_{E,A})(\rho_E^s + t_{E,A}) \quad (14)$$

La ecuación (11) representa el vínculo comercial afectado directamente por las sanciones. Cuando $\tau_{R,EU}$ aumenta, se eleva el costo efectivo de colocar petróleo ruso en

Europa. En cambio, las ecuaciones (12), (13) y (14) describen vínculos comerciales no sancionados directamente, aunque sujetos a costos de transporte, logística y comercialización.

Las condiciones de equilibrio físico del modelo requieren que la demanda de cada región no exceda la cantidad total disponible proveniente de producción interna e importaciones. Para cada región de destino j :

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} x_{ij} \geq y_j, \quad j \in \mathcal{J} \quad (15)$$

Asimismo, la cantidad enviada desde cada región de origen no puede exceder su producción:

$$\sum_{j \in \mathcal{J}} x_{ij} \leq x_i, \quad i \in \mathcal{I} \quad (16)$$

Bajo una solución interior, las restricciones anteriores se cumplen como igualdades, de manera que la producción total se asigna entre consumo interno y exportaciones, y la demanda total se cubre mediante producción doméstica e importaciones.

En términos específicos, para Rusia se establece:

$$x_R = x_{R,R} + x_{R,EU} + x_{R,A} \quad (17)$$

Para los exportadores alternativos:

$$x_E = x_{E,E} + x_{E,EU} + x_{E,A} \quad (18)$$

Para Europa:

$$y_{EU} = x_{EU,EU} + x_{R,EU} + x_{E,EU} \quad (19)$$

Y para Asia:

$$y_A = x_{A,A} + x_{R,A} + x_{E,A} \quad (20)$$

Estas ecuaciones muestran la lógica espacial del modelo. Rusia y los exportadores alternativos distribuyen su producción entre consumo interno y exportaciones. Europa y Asia satisfacen su demanda mediante producción propia e importaciones. Las sanciones no eliminan necesariamente el comercio ruso, sino que modifican los costos relativos entre rutas, afectando la asignación espacial de los flujos.

Para garantizar consistencia entre cantidades y precios, el modelo incorpora condiciones de optimalidad para demanda y oferta:

$$p_i^d \leq \rho_i^d, i \in \mathcal{I} \quad (21)$$

$$p_i^s \geq \rho_i^s, i \in \mathcal{I} \quad (22)$$

con igualdad cuando $y_i > 0$ y $x_i > 0$, respectivamente. La ecuación (21) asegura que la disposición marginal a pagar no exceda el precio de demanda de mercado, mientras que la ecuación (22) establece que el costo marginal de producción no sea inferior al precio de oferta de mercado.

La formulación completa del problema se expresa como un modelo de optimización no lineal. La función objetivo maximiza la ganancia social neta monetaria, definida

como el valor económico del consumo menos el costo de producción, los costos de transporte y los costos equivalentes asociados a las restricciones comerciales (Takayama y Judge, 1971; Devadoss y Ridley, 2014). Dado que las sanciones no constituyen necesariamente un ingreso fiscal para la región importadora, sino una fricción comercial que puede reflejar costos de cumplimiento, seguros, financiamiento o riesgo logístico, se incorporan como un costo de comercio equivalente:

$$\max_{y_i, x_i, x_{ij}} \left[\sum_{i \in J} \int_0^{y_i} p_i^d(q) dq - \sum_{i \in J} \int_0^{x_i} p_i^s(q) dq - \sum_{i \in J} \sum_{j \in J} x_{ij} t_{ij} - \sum_{i \in J} \sum_{j \in J} x_{ij} \tau_{ij} (\rho_i^s + t_{ij}) \right] \quad (23)$$

sujeto a:

$$\sum_{i \in J} x_{ij} \geq y_j, j \in J \quad (24)$$

$$\sum_{j \in J} x_{ij} \leq x_i, i \in J \quad (25)$$

$$p_i^d \leq \rho_i^d, i \in J \quad (26)$$

$$p_i^s \geq \rho_i^s, i \in J \quad (27)$$

$$\rho_j^d \leq (1 + \tau_{ij})(\rho_i^s + t_{ij}), i, j \in J \quad (28)$$

$$y_i, x_i, x_{ij} \geq 0, i, j \in J \quad (29)$$

La ecuación (23) representa el excedente económico neto del sistema. El primer término corresponde al beneficio bruto del consumo; el segundo, al costo total de producción; el tercero, al costo de transporte; y el cuarto, al costo equivalente asociado a sanciones o restricciones comerciales. Las

ecuaciones (24) y (25) garantizan el equilibrio físico de cantidades. Las ecuaciones (26) y (27) establecen consistencia entre precios regionales y precios de mercado. La ecuación (28) representa la condición de arbitraje espacial ajustada por transporte y sanciones. Finalmente, la ecuación (29) impone no negatividad en consumo, producción y flujos comerciales.

Con funciones inversas lineales, los componentes de la función objetivo pueden expresarse como:

$$\int_0^{y_i} (a_i - b_i q) dq = a_i y_i - \frac{1}{2} b_i y_i^2 \quad (30)$$

$$\int_0^{x_i} (c_i + d_i q) dq = c_i x_i + \frac{1}{2} d_i x_i^2 \quad (31)$$

Por tanto, la función de excedente neto puede reescribirse como:

$$\max_{y_i, x_i, x_{ij}} \left[\sum_{i \in J} \left(a_i y_i - \frac{1}{2} b_i y_i^2 \right) - \sum_{i \in J} \left(c_i x_i + \frac{1}{2} d_i x_i^2 \right) - \sum_{i \in J} \sum_{j \in J} x_{ij} t_{ij} - \sum_{i \in J} \sum_{j \in J} x_{ij} \tau_{ij} (\rho_i^s + t_{ij}) \right] \quad (32)$$

El análisis de bienestar se obtiene a partir de la comparación entre el escenario base y los escenarios con sanciones. Para cada región importadora j , el excedente del consumidor se define como:

$$EC_j = \int_0^{y_j} p_j^d(q) dq - \rho_j^d y_j \quad (33)$$

Para cada región productora i , el excedente del productor se define como:

$$EP_i = \rho_i^S x_i - \int_0^{x_i} p_i^S(q) dq \quad (34)$$

El bienestar neto regional puede expresarse como:

$$W_i = EC_i + EP_i - C_i^T - C_i^S \quad (35)$$

donde C_i^T representa los costos de transporte asociados a la región i , y C_i^S los costos equivalentes derivados de sanciones o restricciones comerciales. El bienestar agregado del sistema se define como:

$$W = \sum_{i \in J} W_i \quad (36)$$

Finalmente, el efecto económico de las sanciones se evalúa mediante la variación del bienestar entre escenarios:

$$\Delta W = W^k - W^0 \quad (37)$$

donde W^0 corresponde al bienestar del escenario base y W^k al bienestar bajo sanciones. De forma análoga, pueden calcularse cambios en precios, cantidades y flujos comerciales:

$$\Delta x_{ij} = x_{ij}^k - x_{ij}^0 \quad (38)$$

$$\Delta \rho_i = \rho_i^k - \rho_i^0 \quad (39)$$

La solución del modelo permite obtener los precios de equilibrio, las cantidades producidas y consumidas, los flujos bilaterales de comercio y los cambios en bienestar para cada bloque regional. En este marco, las sanciones al petróleo ruso se

analizan como una fricción comercial exógena que modifica los costos relativos entre rutas y, por tanto, la distribución espacial del comercio internacional de petróleo crudo

Estructura regional del mercado petrolero

La arquitectura regional del modelo no responde a una división geográfica convencional, sino a una delimitación funcional basada en la reconfiguración de los flujos comerciales de petróleo crudo observada entre 2022 y 2024, de acuerdo con los datos de Resource Trade Earth. Se definen cuatro bloques $J = \{R, E, EU, A\}$, los cuales permiten aislar el mecanismo de sanción, sustitución y redireccionamiento comercial del mercado petrolero internacional.

Rusia se integra como bloque independiente al constituir el nodo de origen del choque comercial analizado. En 2022, suministró 94.4 millones de toneladas métricas (Mt) de petróleo crudo a Europa y ocupó la primera posición entre los proveedores de dicha región. Para 2023 y 2024, Estados Unidos aparece como principal abastecedor europeo, con 91.6 Mt y 93.3 Mt, respectivamente. Esta modificación en la composición del abastecimiento europeo justifica tratar a

Rusia como el bloque sobre el cual se introduce la cuña comercial $\tau_{R,EU}$, asociada a las sanciones aplicadas al crudo ruso con destino a Europa.

El bloque de exportadores alternativos agrupa a los oferentes que sustituyen parcialmente el abastecimiento ruso en el mercado europeo. Este bloque incluye a Estados Unidos, Noruega, Kazajistán, Irak, Libia, Arabia Saudita y Emiratos Árabes Unidos. La agregación de estos países no supone homogeneidad productiva, logística o institucional; responde a una equivalencia funcional dentro del modelo, ya que todos participan como fuentes alternativas de oferta exportable hacia Europa y no están sujetos directamente a la cuña comercial aplicada al crudo ruso. Europa, por su parte, se define como el bloque importador donde se introduce la fricción institucional del modelo, debido a que ahí se observa el cambio más directo en la composición de proveedores: Rusia fue el principal proveedor en 2022, mientras que Estados Unidos ocupó esa posición en 2023 y 2024. En consecuencia, Europa se modela como el mercado donde la sanción modifica el costo relativo del petróleo ruso frente al crudo procedente de exportadores alternativos.

Asia se incorpora como bloque importador de absorción, integrado por China, India y economías de Asia del Sur y Central. Esta agregación permite mantener una estructura parsimoniosa de cuatro regiones, aunque se reconoce que China e India presentan patrones de abastecimiento distintos. En Asia del Sur y Central, excluyendo China, Rusia pasó de la tercera posición como proveedor en 2022, con 37.5 Mt, a la primera posición en 2023 y 2024, con 89.7 Mt y 92.5 Mt, respectivamente. En China, Rusia pasó de 86.2 Mt en 2022 a 100.0 Mt en 2023 y 108.0 Mt en 2024. Estos datos sustentan la representación de Asia como destino alternativo del crudo ruso redirigido.

Con esta delimitación, las relaciones comerciales centrales del modelo son:

$$x_{R,EU}, x_{R,A}, x_{E,EU}, x_{E,A}$$

donde $x_{R,EU}$ representa las exportaciones de Rusia hacia Europa; $x_{R,A}$, las exportaciones de Rusia hacia Asia; $x_{E,EU}$, las exportaciones de los exportadores alternativos hacia Europa; y $x_{E,A}$, las exportaciones de los exportadores alternativos hacia Asia. La cuña comercial asociada a las sanciones se introduce principalmente sobre $x_{R,EU}$; el flujo $x_{R,A}$ permite representar la redirección del crudo ruso hacia Asia, mientras que $x_{E,EU}$

captura la sustitución parcial de Rusia por otros proveedores en Europa. La Tabla 1 sintetiza los flujos utilizados para la delimitación regional del modelo. La información se organiza por mercado

importador y año, con el propósito de mostrar el cambio en el abastecimiento europeo y el incremento de la participación rusa en los mercados asiáticos considerados.

Tabla 1. Flujos de petróleo crudo 2022-2024

Mercado importador	Año	Proveedor reportado	Posición	Volumen (Mt)
Europa	2022	Rusia	1	94.4
Europa	2023	Estados Unidos	1	91.6
Europa	2024	Estados Unidos	1	93.3
Asia del Sur y Central	2022	Rusia	3	37.5
Asia del Sur y Central	2023	Rusia	1	89.7
Asia del Sur y Central	2024	Rusia	1	92.5
China	2022	Rusia	2	86.2
China	2023	Rusia	1	100
China	2024	Rusia	1	108

Fuente: elaboración propia con datos de Resource Trade Earth.

Datos y fuentes

La calibración del modelo se realizó con información anual de flujos comerciales bilaterales de petróleo crudo, valores monetarios y volúmenes físicos para 2022 y 2024. Los datos de comercio (x_{ij}) se obtuvieron de Resource Trade Earth (2026). La selección de 2022 y 2024 permite comparar el año de inicio del conflicto Rusia-Ucrania con un periodo posterior en el que ya se observa una recomposición de los flujos entre Europa y Asia.

Para obtener los precios regionales implícitos

(p_{ij}), se utilizó el método de valores unitarios de comercio. Este indicador se calculó como el cociente entre el valor monetario del flujo comercial y su volumen físico:

$$p_{ij,t} = \frac{V_{ij,t}}{Q_{ij,t}} \tag{40}$$

donde $p_{ij,t}$ representa el precio unitario implícito del flujo desde la región i hacia la región j en el año t , $V_{ij,t}$ es el valor del comercio expresado en dólares estadounidenses y $Q_{ij,t}$ es el volumen físico en toneladas métricas. Dado que los valores se expresan en miles de millones de dólares y los volúmenes en millones de toneladas, el

cálculo operativo en dólares por tonelada fue:

$$p_{ij,t} = \frac{V_{ij,t} \times 1000}{Q_{ij,t}} \quad (41)$$

El valor unitario no se interpreta como un precio spot, sino como un precio promedio implícito del flujo comercial observado⁶.

Tabla 2. Matriz de flujos comerciales, valores y precios unitarios implícitos de petróleo crudo

Flujo comercial	Año	Volumen (Q) (Mt)	Valor (V) (mil mdd)	Precio unitario (p) (USD/t)
Rusia- Europa	2022	94.40	63.30	670.55
Rusia- Asia del Sur y Central	2022	37.50	23.10	616.00
Rusia- Asia del Sur y Central	2024	92.50	54.20	585.95
Rusia-China	2022	86.20	59.30	687.94
Rusia-China	2024	108.00	66.60	616.67
Estados Unidos- Europa	2024	93.30	66.40	711.68
Noruega-Europa	2024	82.00	58.20	709.76

Fuente: elaboración propia con datos de Resource Trade Earth.

Nota: Mt = millones de toneladas métricas; mil mdd = miles de millones de dólares estadounidenses. El precio unitario se calculó como $(V \times 1000)/Q$.

Para estimar la oferta y la demanda regional del modelo se utilizaron las series anuales de la U.S. Energy Information Administration (EIA). La producción regional (x_i) se obtuvo de la serie *total petroleum and other liquids production*, reportada en miles de barriles diarios. El consumo regional (y_i) se obtuvo de la serie *petroleum and other liquids consumption*, también reportada en miles de barriles diarios. Ambas variables se transformaron a millones de toneladas métricas mediante la siguiente expresión:

$$Mt_{i,t} = \frac{TBDP_{i,t} \times 365}{7.5 \times 1000} \quad (42)$$

donde $Mt_{i,t}$ representa millones de toneladas

métricas para la región i en el año t ; $TBDP_{i,t}$ corresponde al valor reportado por la EIA en miles de barriles diarios; 365 convierte el flujo diario en volumen anual; 7.5 es el factor de conversión utilizado de barriles por tonelada; y 1000 ajusta la unidad de miles de barriles a millones de barriles. De esta manera, la producción (x_i) y el consumo (y_i) quedan expresados en la misma unidad que los flujos comerciales bilaterales.

Para cada bloque regional, los valores de producción y consumo se obtuvieron agregando los países incluidos en el bloque correspondiente. El bloque de exportadores alternativos (E) incluye Estados Unidos,

Noruega, Kazajistán, Irak, Libia, Arabia Saudita y Emiratos Árabes Unidos. El bloque de Asia (A) incluye China, India y las economías de Asia del Sur y Central consideradas en la agregación del modelo. A partir de estos datos se calculó el balance petrolero regional:

$$B_{i,t} = x_{i,t} - y_{i,t} \tag{43}$$

donde $B_{i,t} > 0$ indica oferta exportable neta y $B_{i,t} < 0$ indica exceso de demanda. Este balance se utiliza para verificar que Rusia y los exportadores alternativos funcionen como regiones oferentes netas, mientras que Europa y Asia operen como regiones demandantes netas dentro del modelo de equilibrio espacial.

Tabla 3. Producción, consumo y balance por bloque regional, 2022 y 2024

Bloque regional	Producción 2022 (x_i)(Mt)	Consumo 2022 (y_i)(Mt)	Balance 2022 (B_i)(Mt)	Producción n 2024 (x_i)(Mt)	Consumo 2024 (y_i) (Mt)	Balance 2024 (B_i)(Mt)
Rusia (R)	534.30	180.20	354.00	512.60	184.50	328.10
Exportadores alternativos (E)	2269.10	1276.40	992.70	2330.70	1309.00	1021.70
Europa (EU)	95.10	650.20	-555.10	86.20	641.20	-555.00
Asia (A)	313.50	1056.10	-742.50	325.60	1134.40	-808.80

Fuente: elaboración propia con datos de la U.S. Energy Information Administration.
Nota: la producción corresponde a *total petroleum and other liquids production* y el consumo a *petroleum and other liquids consumption*. Los valores originales, reportados en miles de barriles diarios, se convirtieron a millones de toneladas métricas usando un factor de 7.5 barriles por tonelada.

Calibración del modelo y escenarios de simulación

La calibración del modelo se realizó a partir de las funciones inversas de demanda y oferta definidas en las ecuaciones (3) y (4), con el objetivo de construir funciones lineales que reprodujeran el punto base observado para cada bloque regional antes de introducir la fricción sancionatoria. Para cada bloque

regional $i \in \mathcal{I}$, los coeficientes a_i , b_i , c_i y d_i se obtuvieron con base en el precio regional de referencia (p_i), el consumo observado (y_i), la producción observada (x_i) y las elasticidades precio de corto plazo. En el escenario base se adoptaron elasticidades homogéneas de $\varepsilon_d = -0.05$ para la demanda y $\varepsilon_s = 0.05$ para la oferta, consistentes con la baja respuesta de corto plazo del mercado petrolero ante

variaciones en precios, asociada a restricciones de capacidad, contratos de abastecimiento, rigideces productivas y limitada sustitución inmediata del consumo energético (Caldara et al., 2019).

Los coeficientes de las funciones inversas se calcularon mediante las siguientes expresiones:

$$b_i = \frac{p_i}{|\varepsilon_d| y_i} \quad (44)$$

$$a_i = p_i + b_i y_i \quad (45)$$

$$d_i = \frac{p_i}{\varepsilon_s x_i} \quad (46)$$

$$c_i = p_i - d_i x_i \quad (47)$$

donde b_i y d_i representan las pendientes de las funciones inversas de demanda y oferta, respectivamente, mientras que a_i y c_i corresponden a sus interceptos. Bajo esta especificación, cada curva queda anclada al precio, producción y consumo observados en el año base.

La Tabla 4 presenta las variables empíricas utilizadas como punto de partida para la calibración de las funciones inversas. La producción (x_i) y el consumo (y_i) corresponden a los valores regionales estimados para 2022, mientras que el precio base (p_i) se obtuvo a partir de los valores unitarios implícitos de comercio.

Tabla 4. Variables base para la calibración de las funciones inversas

Bloque regional	Producción (x_i)(Mt)	Consumo (y_i)(Mt)	Precio base p_i (USD/t)	(ε_d)	(ε_s)
Rusia (R)	534.30	180.20	670.55	-0.05	0.05
Exportadores alternativos (E)	2269.10	1276.40	711.68	-0.05	0.05
Europa (EU)	95.10	650.20	710.72	-0.05	0.05
Asia (A)*	313.50	1056.10	666.13	-0.05	0.05

Fuente: elaboración propia con datos de Resource Trade Earth y la U.S. Energy Information Administration.

Nota: *Para Asia, el precio base se calculó como promedio ponderado de los flujos Rusia–China y Rusia–Asia del Sur y Central en 2022.

Con base en las variables de la Tabla 4 y mediante las ecuaciones (44) a (47), se calcularon los coeficientes de las funciones

inversas de demanda y oferta. La Tabla 5 reporta dichos coeficientes para cada bloque regional.

Tabla 5. Coeficientes calibrados de oferta y demanda inversa

Bloque regional	(a_i)	(b_i)	(c_i)	(d_i)
Rusia (R)	14,081.55	74.42	-12,740.45	25.10
Exportadores alternativos (E)	14,945.28	11.15	-13,521.92	6.27
Europa (EU)	14,925.12	21.86	-13,503.68	149.47
Asia (A)	13,988.73	12.62	-12,656.47	42.50

Fuente: elaboración propia.

Con los coeficientes calibrados, el modelo se resolvió como un problema de optimización no lineal orientado a maximizar el bienestar neto definido en la ecuación (23), sujeto a las restricciones de balance físico, arbitraje espacial y no negatividad establecidas en las ecuaciones (24) a (29). En cada escenario, la estructura de oferta y demanda permanece fija y únicamente se modifica el valor de la cuña comercial aplicada al flujo $x_{R,EU}$. De esta forma, las variaciones en flujos, precios y bienestar se atribuyen al cambio exógeno en la fricción sancionatoria.

La cuña comercial $\tau_{R,EU}$ se parametrizó como un equivalente *ad valorem* derivado de diferenciales de precios unitarios implícitos entre flujos de petróleo ruso y flujos de exportadores alternativos (Devadoss, 2013; Nagurney et al. 2019). En 2024, el precio unitario del flujo Estados Unidos–Europa fue de 711.68 USD/t, mientras que el precio unitario del flujo Rusia–China fue de 616.67

USD/t. La diferencia fue de 95.01 USD/t, equivalente a 13.35% del precio unitario estadounidense hacia Europa, o 12.67 USD/barril.

El precio unitario agregado del flujo $E \rightarrow EU$, calculado con Estados Unidos y Noruega, fue de 710.78 USD/t, mientras que el precio unitario agregado del flujo $R \rightarrow A$ fue de 602.49 USD/t. La diferencia entre ambos valores fue de 108.29 USD/t, equivalente a 15.24% del precio unitario agregado de los exportadores alternativos hacia Europa, o 14.44 USD/barril. Estos diferenciales se expresaron como equivalentes *ad valorem* y se utilizaron para construir los escenarios moderado y agregado.

La Tabla 6 resume los escenarios de simulación definidos para la cuña comercial aplicada al flujo $x_{R,EU}$. El escenario base representa la ausencia de fricción adicional; los escenarios moderado y agregado se derivan de diferenciales observados de

precios unitarios; y el escenario de sensibilidad introduce una fricción superior para evaluar la respuesta del modelo ante un aumento adicional del costo comercial equivalente.

Tabla 6. Escenarios de simulación para la cuña comercial aplicada al flujo $x_{R,EU}$

Escenario	$\tau_{R,EU}$	Equivalente ad valorem (%)	Equivalente en USD/t	Equivalente en USD/barril
Base	0.0000	0.00	0.00	0.00
Moderado	0.1335	13.35	95.01	12.67
Agregado	0.1524	15.24	108.29	14.44
Sensibilidad	0.2000	20.00	142.16	18.95

Fuente: elaboración propia con datos de Resource Trade Earth.

Los costos ordinarios de transporte (t_{ij}) se normalizan en cero para aislar el efecto de la cuña *ad valorem* asociada a las sanciones. Esta normalización no implica ausencia de costos logísticos en el mercado petrolero, sino una delimitación del ejercicio de simulación al impacto proporcional de la fricción comercial $\tau_{R,EU}$. Bajo esta especificación, el costo asociado a la cuña se calcula como $\tau_{R,EU}(\rho_R^S + t_{R,EU})x_{R,EU}$.

De manera complementaria, se incorporó una prueba de sensibilidad con costos ordinarios de transporte positivos para evaluar si el patrón de reasignación espacial se mantiene cuando las rutas comerciales enfrentan

fricciones logísticas explícitas. Para este ejercicio se utilizó una matriz estilizada de costos bilaterales expresados en USD/t, construida con una jerarquía relativa de costos por ruta. En dicha matriz, la ruta Rusia–Europa recibe el menor costo relativo, debido a la integración logística previa entre ambos bloques; la ruta exportadores alternativos–Europa se ubica en un nivel intermedio; y las rutas con destino a Asia reciben costos mayores por representar trayectorias comerciales más extensas dentro de la arquitectura del modelo.

Tabla 7. Matriz de costos de transporte

Ruta	Costo (USD/t)
R→EU	20
R→A	35
E→EU	25
E→A	35

Fuente: elaboración propia.
Nota: Los valores corresponden a parámetros de sensibilidad y no a fletes observados.

La simulación compara cada escenario con el escenario base. Las variables de salida son las variaciones en los flujos comerciales bilaterales, los precios de mercado y el bienestar del sistema modelado. En particular, los cambios en bienestar, flujos y precios se calculan conforme a las ecuaciones (37) a (39), donde el superíndice 0 representa el escenario base y k el escenario con fricción comercial. Con ello se evalúa el efecto de $\tau_{R,EU}$ sobre la asignación espacial de los flujos, la formación de precios relativos y el bienestar del sistema modelado. Adicionalmente, la prueba con costos de transporte positivos permite contrastar la sensibilidad de dichos resultados ante la incorporación de fricciones logísticas ordinarias.

Resultados

Reasignación de flujos comerciales

La comparación entre 2022 y 2024 muestra una reconfiguración en la orientación geográfica de los flujos rusos de petróleo crudo. El cambio se observa en la relación entre el flujo hacia Europa ($x_{R,EU}$), asociado al mercado sujeto a mayores restricciones institucionales, y el flujo hacia Asia ($x_{R,A}$). Como se presenta en la Tabla 8, el flujo $x_{R,EU}$ registró una contracción de 86.5%, al pasar de 94.4 Mt en 2022 a 12.7 Mt en 2024. En sentido opuesto, el flujo $x_{R,A}$ aumentó 62.1%, al pasar de 123.7 Mt a 200.5 Mt. El incremento absoluto hacia Asia fue de 76.8 Mt, equivalente al 94.0% de la reducción observada en el flujo hacia Europa. Este resultado muestra una reasignación espacial de magnitud relevante entre los dos destinos.

Tabla 8. Reasignación de los flujos rusos de petróleo, 2022 y 2024

Destino del flujo ruso	Variable	Volumen 2022 (Mt)	Participación 2022 (%)	Volumen 2024 (Mt)	Participación 2024 (%)	Cambio absoluto (Mt)	Variación (%)
Europa	$x_{R,EU}$	94.40	43.30	12.70	6.00	-81.70	-86.50
Asia	$x_{R,A}$	123.70	56.70	200.50	94.00	76.80	62.10
Total considerado	$x_{R,EU} + x_{R,A}$	218.10	100.00	213.20	100.00	-4.90	-2.20

Fuente: elaboración propia con datos de Resource Trade Earth.

Nota: El total considerado se limita a los flujos incluidos en la arquitectura del modelo, por lo que no representa la totalidad de las exportaciones globales de petróleo crudo de la Federación Rusa.

La recomposición también se observa en las participaciones relativas. En 2022, Europa representaba 43.3% del volumen considerado y Asia 56.7%. Para 2024, la participación europea se redujo a 6.0%, mientras que Asia concentró 94.0% del total incluido en el modelo. Por tanto, el cambio principal no fue una expansión del volumen agregado de las dos rutas, sino una modificación en su distribución regional.

El volumen total considerado pasó de 218.1 Mt en 2022 a 213.2 Mt en 2024, con una variación de -2.2%. Esta reducción moderada contrasta con la fuerte caída del flujo hacia Europa y el aumento del flujo hacia Asia. En términos de resultados descriptivos, el patrón observado indica una reasignación del crudo ruso entre destinos, más que una contracción proporcional del volumen conjunto analizado.

Resultados del modelo de equilibrio espacial

La simulación del modelo se realizó bajo los cuatro escenarios definidos en la sección metodológica: base, moderado, agregado y sensibilidad. En esta especificación inicial, los costos ordinarios de transporte (t_{ij}) se normalizaron en cero con el propósito de aislar el efecto de la cuña *ad valorem* aplicada al flujo $x_{R,EU}$. Por ello, los resultados deben interpretarse como una simulación base de reasignación espacial inducida por la fricción sancionatoria, no como una estimación completa de todos los costos logísticos del mercado petrolero internacional.

La Tabla 9 presenta las soluciones del modelo para el bienestar neto del sistema y los cuatro flujos comerciales centrales. En el escenario base, sin cuña sancionatoria, Rusia mantiene un flujo positivo hacia Europa de 97.76 Mt y un flujo hacia Asia de 252.01 Mt. Al

introducir una cuña *ad valorem* de 13.35%, el flujo $x_{R,EU}$ se reduce a cero, mientras que $x_{R,A}$ aumenta a 349.77 Mt. De manera simultánea, el flujo de los exportadores alternativos hacia Europa ($x_{E,EU}$) aumenta de 463.71 Mt a

561.47 Mt, mientras que el flujo de exportadores alternativos hacia Asia ($x_{E,A}$) disminuye de 498.50 Mt a 400.74 Mt.

Tabla 9. Resultados del modelo de equilibrio espacial por escenario

Variable	Escenario			
	Base	Moderado	Agregado	Sensibilidad
$\tau_{R,EU}$	0.0000	0.1335	0.1524	0.2000
W	44,420,935	44,420,935	44,420,935	44,420,935
$x_{R,EU}$	97.76	0.00	0.00	0.00
$x_{R,A}$	252.01	349.77	349.77	349.77
$x_{E,EU}$	463.71	561.47	561.47	561.47
$x_{E,A}$	498.50	400.74	400.74	400.74

Fuente: elaboración propia con resultados del modelo resuelto en Microsoft Excel®.

Nota. W representa el bienestar neto del sistema. Los flujos se expresan en millones de toneladas métricas.

Los resultados muestran un efecto umbral en la asignación espacial de los flujos. En el escenario base, Rusia abastece simultáneamente a Europa y Asia. Sin embargo, la introducción de una cuña moderada de 13.35% es suficiente para inducir una solución de esquina en la ruta sancionada, llevando el flujo $x_{R,EU}$ a cero. Una vez alcanzada esta solución, los incrementos adicionales de la cuña en los escenarios agregado y de sensibilidad no modifican la estructura de flujos, porque la ruta Rusia–Europa ya permanece inactiva. La reasignación se produce mediante dos

movimientos compensatorios; el volumen que Rusia deja de enviar a Europa se redirige hacia Asia, por lo que $x_{R,A}$ aumenta de 252.01 a 349.77 Mt. Al mismo tiempo, el bloque de exportadores alternativos sustituye el suministro ruso en Europa, elevando $x_{E,EU}$ de 463.71 a 561.47 Mt. Como contraparte, el flujo de exportadores alternativos hacia Asia ($x_{E,A}$) disminuye de 498.50 a 400.74 Mt. Bajo esta especificación, la sanción no reduce el volumen total asignado dentro del sistema, sino que modifica su distribución regional. El precio de equilibrio del sistema permanece prácticamente constante entre escenarios,

ubicándose alrededor de 589.25 USD/t. Las diferencias observadas entre precios de oferta y demanda son marginales y responden al redondeo numérico de la solución. Bajo la especificación base, la cuña aplicada a $x_{R,EU}$ opera principalmente como un mecanismo de reasignación espacial de flujos, sin generar cambios apreciables en el precio de equilibrio.

El bienestar neto del sistema también permanece constante en los cuatro escenarios ($W=44,420,935$). Este resultado debe interpretarse como una propiedad de la especificación base, no como evidencia de ausencia general de costos económicos asociados a las sanciones. En particular, al

anularse el flujo $x_{R,EU}$, el término asociado a la cuña deja de operar directamente sobre la función objetivo. En consecuencia, el efecto estimado de la sanción se expresa como recomposición espacial de los flujos comerciales, sin variación del bienestar agregado bajo los supuestos adoptados.

La Tabla 10 reporta la prueba de sensibilidad del modelo ante costos de transporte positivos. En este ejercicio se mantienen los cuatro escenarios de cuña sancionatoria y se modifica únicamente el supuesto sobre costos logísticos, pasando de $t_{ij} = 0$ a la matriz $t_{ij} > 0$ definida en la sección metodológica.

Tabla 10. Sensibilidad del modelo con costos de transporte positivos

Variable	Escenario			
	Base	Moderado	Agregado	Sensibilidad
$\tau_{R,EU}$	0.0000	0.1335	0.1524	0.2000
W	44,378,797	44,380,684	44,380,684	44,380,684
$x_{R,EU}$	91.64	0.00	0.00	0.00
$x_{R,A}$	250.62	349.20	349.20	349.20
$x_{E,EU}$	467.64	560.72	560.72	560.72
$x_{E,A}$	495.81	398.81	398.81	398.81

Fuente: elaboración propia con resultados del modelo resuelto en Microsoft Excel®.

Los resultados muestran que la incorporación de costos de transporte positivos no modifica el patrón cualitativo de la simulación principal. En el escenario base, el flujo $x_{R,EU}$ permanece positivo, con 91.64 Mt; sin embargo, al introducir la cuña sancionatoria, dicho flujo se reduce a cero en los escenarios moderado, agregado y de sensibilidad. De manera simultánea, $x_{R,A}$ aumenta de 250.62 Mt a alrededor de 349.20 Mt, mientras que $x_{E,EU}$ se incrementa de 467.64 Mt a aproximadamente 560.70 Mt.

La principal diferencia respecto a la simulación con $t_{ij} = 0$ se observa en el nivel del bienestar neto del sistema. Al incorporar costos de transporte positivos, W se ubica por debajo del nivel estimado en la simulación sin fricciones logísticas, lo que confirma que la normalización de $t_{ij} = 0$ influye en la magnitud del bienestar calculado. No obstante, la estructura de reasignación se mantiene: la cuña sobre $x_{R,EU}$ desactiva la ruta Rusia–Europa, redirige el flujo ruso hacia Asia y aumenta el abastecimiento europeo proveniente de exportadores alternativos.

Discusión

La simulación muestra que las sanciones

institucionales aplicadas al crudo ruso modifican el equilibrio del mercado modelado principalmente mediante una reasignación espacial de flujos. La introducción de la cuña comercial $\tau_{R,EU}$ induce una solución de esquina en la ruta Rusia–Europa ($x_{R,EU}$), desplazando la oferta rusa hacia Asia ($x_{R,A}$) y sustituyendo el abastecimiento europeo mediante el bloque de exportadores alternativos ($x_{E,EU}$). Bajo la especificación base, el efecto central de la sanción no es una contracción del volumen agregado asignado dentro del sistema, sino una redistribución de rutas comerciales.

Este resultado es consistente con Kilian et al. (2024), quienes muestran que el embargo y el mecanismo de límite de precios redujeron el precio efectivo recibido por Rusia y aumentaron la relevancia de destinos más lejanos, en particular India. También coincide con Spiro et al. (2025), quienes documentan que las sanciones petroleras no operaron únicamente mediante restricciones directas al mercado europeo, sino mediante descuentos, cambios en patrones comerciales y costos asociados al redireccionamiento del crudo ruso hacia compradores alternativos.

El enfoque de equilibrio espacial utilizado en este artículo complementa los estudios que

analizan el conflicto Rusia-Ucrania desde los canales de volatilidad, conectividad financiera y transmisión de precios. Maneejuk et al. (2024) examinan los efectos del conflicto sobre los ciclos de precios de energías fósiles y renovables; Zhou et al. (2024) estudian los desbordamientos entre petróleo y otras materias primas; y Baltodano et al. (2025) analizan la relación entre rendimientos energéticos, incertidumbre energética y riesgo geopolítico mediante factores comunes de volatilidad. A diferencia de esos enfoques, el modelo aquí desarrollado se concentra en la asignación física de flujos entre bloques, por lo que permite observar cómo una fricción localizada en una ruta específica modifica simultáneamente el patrón de abastecimiento de exportadores e importadores.

La neutralidad observada en el bienestar neto agregado (W) debe interpretarse como una propiedad de la especificación base, no como evidencia de ausencia de costos económicos en el mercado real. La invariancia de W en la simulación principal se explica por dos supuestos operativos: la normalización de los costos ordinarios de transporte ($t_{ij} = 0$) y la posibilidad de sustituir completamente la ruta sancionada por rutas no sancionadas. La

prueba de sensibilidad con costos positivos refuerza esta interpretación, ya que el nivel de bienestar estimado cambia cuando se incorporan fricciones logísticas explícitas, mientras que el patrón de reasignación espacial se mantiene. Este resultado no contradice a Crozet y Hinz (2020), quienes estiman pérdidas comerciales derivadas de las sanciones a Rusia mediante un marco de gravedad estructural. La diferencia radica en el alcance metodológico: Crozet y Hinz cuantifican efectos comerciales agregados asociados a sanciones y contrasanciones, mientras que este artículo aísla una fricción aplicada a una ruta petrolera específica dentro de un modelo de cuatro bloques.

La interpretación del bienestar también debe contrastarse con Kilian et al. (2024) y Spiro et al. (2025). Kilian et al. asocian parte del descuento del crudo ruso con costos de transporte más elevados hacia destinos alternativos, mientras que Spiro et al. incorporan precios, descuentos, comercio y transporte para evaluar el efecto de las sanciones petroleras sobre Rusia. En la simulación base, el modelo abstrae las fricciones logísticas ordinarias; no obstante, la prueba de sensibilidad muestra que su incorporación modifica el nivel de bienestar

estimado sin alterar el mecanismo central de reasignación. El modelo tampoco capta primas de riesgo, seguros marítimos, costos financieros, restricciones portuarias, disponibilidad de buques, calidad del crudo ni costos de refinación. Por ello, la neutralidad de W debe leerse como una propiedad de la especificación base, mientras que la prueba de sensibilidad permite mostrar que la incorporación de costos de transporte positivos modifica el nivel de bienestar estimado sin alterar el patrón general de reasignación.

Los resultados permiten identificar cambios en la posición comercial de los bloques, pero no ganancias netas por país. El bloque de exportadores alternativos incrementa su abastecimiento hacia Europa; Asia absorbe una mayor proporción del crudo ruso; y Europa sustituye el origen de sus importaciones dentro del sistema modelado. Esta restricción es particularmente relevante en el bloque asiático, donde China, India y las economías de Asia del Sur y Central se agregan en un solo nodo importador, pese a que presentan diferencias en capacidad de refinación, estructura contractual, elasticidad de demanda, infraestructura portuaria, acceso a seguros, exposición a sanciones

secundarias y poder de negociación frente al crudo ruso. En consecuencia, el modelo identifica la función de Asia como nodo de absorción del crudo redirigido, pero no permite distinguir los efectos específicos entre China, India y otros importadores regionales. Para ello sería necesario desagregar los bloques, incorporar precios contractuales, descuentos por calidad, costos de refinación, seguros, riesgos de sanción secundaria y restricciones logísticas por ruta. Otra limitación se refiere a la representación de las sanciones como una cuña *ad valorem* equivalente. En la práctica, el régimen sancionatorio opera mediante instrumentos múltiples: embargos, restricciones al aseguramiento marítimo, financiamiento, certificaciones de precio, sanciones secundarias y designaciones de entidades o buques. La ampliación de sanciones energéticas anunciada por el Departamento del Tesoro en enero de 2025, dirigida contra productores rusos, buques, traders, proveedores de servicios petroleros, aseguradoras y funcionarios del sector, muestra que la fricción institucional es más compleja que un único parámetro $\tau_{R,EU}$. Por ello, $\tau_{R,EU}$ debe interpretarse como un indicador sintético de distorsión comercial,

no como una medición directa de todos los costos legales, financieros y logísticos del régimen sancionatorio.

Dentro de estas restricciones, el modelo ofrece un resultado coherente con su estructura: una penalización sobre la ruta Rusia–Europa desactiva ese vínculo y redistribuye los flujos hacia nodos no sancionados. La hipótesis de trabajo se apoya en lo relativo a la reasignación espacial del comercio petrolero, pero no en términos de una pérdida agregada de bienestar bajo la especificación base. En consecuencia, la efectividad económica de las sanciones depende no solo de la restricción institucional, sino de la magnitud de las fricciones financieras, regulatorias y logísticas que limitan la capacidad de arbitraje espacial de los agentes.

Conclusiones

Esta investigación analizó los efectos económicos de las sanciones al petróleo ruso mediante un modelo de equilibrio espacial aplicado a cuatro bloques regionales: Rusia, exportadores alternativos, Europa y Asia. El objetivo fue evaluar si una fricción comercial asociada a las sanciones modifica la asignación de los flujos petroleros, los

precios de equilibrio y el bienestar del sistema modelado.

Los resultados confirman parcialmente la hipótesis de trabajo. Las sanciones, representadas como una cuña *ad valorem* sobre el vínculo Rusia–Europa, modifican la asignación espacial del comercio petrolero e inducen una recomposición de rutas entre los bloques considerados. En este sentido, el principal efecto identificado no es una reducción proporcional del volumen total asignado, sino una redistribución geográfica del abastecimiento.

La evidencia observada entre 2022 y 2024 y los resultados de simulación apuntan en la misma dirección: el mercado europeo reduce su vínculo directo con el crudo ruso, mientras que Asia adquiere mayor relevancia como destino alternativo. A su vez, el modelo muestra que los exportadores alternativos absorben parte del espacio dejado por Rusia en Europa. Este resultado permite interpretar las sanciones como una fricción que altera los incentivos de localización comercial y modifica las condiciones de arbitraje espacial.

El efecto sobre precios y bienestar debe interpretarse dentro del alcance del modelo. Bajo la especificación base, el precio de

equilibrio y el bienestar neto agregado permanecen estables, debido a que el sistema permite una reasignación completa de flujos y normaliza los costos ordinarios de transporte. La prueba de sensibilidad muestra que, al incorporar costos positivos, el nivel de bienestar estimado cambia, aunque se conserva el patrón de reasignación espacial. Por ello, el estudio no concluye que las sanciones carezcan de costos económicos, sino que la magnitud de su efecto sobre el bienestar depende de las fricciones logísticas incorporadas en la especificación del modelo. La aportación central del artículo consiste en formalizar el impacto de las sanciones desde la economía espacial, desplazando el énfasis desde la volatilidad de precios hacia la estructura física de los flujos comerciales. Este enfoque permite mostrar que la

efectividad económica de las sanciones depende de su capacidad para limitar el arbitraje espacial de los agentes. Cuando existen rutas alternativas y mercados capaces de absorber los flujos desplazados, la restricción institucional puede traducirse principalmente en desviación de comercio, más que en una contracción inmediata del sistema.

Las sanciones al petróleo ruso funcionan como una fricción comercial que reordena la geografía del comercio energético. Su impacto económico final depende de la intensidad de las restricciones logísticas, financieras y regulatorias que acompañan a la medida sancionatoria, así como de la capacidad de los mercados alternativos para absorber el crudo redirigido.

Notas:

¹ Indicador de referencia (*benchmark*) internacional para el petróleo crudo ligero y dulce extraído en el Mar del Norte, utilizado para fijar el precio de gran parte del comercio mundial U.S. Department of Energy, (2026).

² Principal mezcla de exportación de crudo ruso, caracterizada por ser un petróleo pesado y amargo con mayor contenido de azufre que el estándar global International Energy Agency, (2024).

³ Asia del Sur y Central corresponde a la agregación regional utilizada por Resource Trade Earth e incluye Afganistán, Bangladesh, Bután, India, Irán, Kazajistán, Kirguistán, Maldivas, Nepal, Pakistán, Sri Lanka, Tayikistán, Turkmenistán y Uzbekistán. En los flujos de petróleo crudo analizados, India concentra más de 95% del valor importado de esta región en 2022 y 2024.

⁴ Para la implementación operativa, los efectos de los desplazadores Y_i y Z_i se consideran constantes y quedan capturados dentro de los interceptos a_i y c_i respectivamente.

⁵ El equilibrio requiere que se cumplan las condiciones de balance para cada región, donde la producción x_i y el consumo y_i se vinculan con los flujos bilaterales x_{ij} de la siguiente forma: $y_i = x_i + \sum_{j \neq i} x_{ji} - \sum_{j \neq i} x_{ij}$.

⁶ Por ello, puede incorporar diferencias en calidad del crudo, costos de transporte, seguros, condiciones contractuales, descuentos comerciales y restricciones logísticas. Esta precisión es relevante porque el diferencial entre flujos no debe atribuirse exclusivamente a las sanciones.

Referencias:

- Baltodano López, O., Billio, M., Casarin, R. y Costola, M. (2025). “Compounding geopolitical and energy risks: A clustered stochastic multi-COVOL model”. *Energy Economics*, 149, 108700. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2025.108700>
- Caldara, D., Cavallo, M. y Iacoviello, M. (2019). “Oil price elasticities and oil price fluctuations”. *Journal of Monetary Economics*, 103, 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.jmoneco.2018.08.004>
- Crozet, M. y Hinz, J. (2020). “Friendly fire: The trade impact of the Russia sanctions and counter-sanctions”. *Economic Policy*, 35(101), 97–146. <https://doi.org/10.1093/epolic/eiaa006>
- Devadoss, S. (2013). “Ad valorem tariff and spatial equilibrium models”. *Applied Economics*, 45(23), 3378–3386. <https://doi.org/10.1080/00036846.2012.711943>
- Devadoss, S. y Ridley, W. (2014). “Effects of the Mexican apple tariff on the world apple market”. *Review of Development Economics*, 18(4), 763–777. <https://doi.org/10.1111/rode.12117>
- Huszár, Z. R., Kotró, B. B. y Tan, R. S. K. (2023). “Dynamic volatility transfer in the European oil and gas industry”. *Energy Economics*, 127, 107052. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2023.107052>
- International Energy Agency. (2024). *Oil 2024: Analysis and forecast to 2030*. IEA.
- Islam, M. M., Sohag, K., Berezin, A. y Sergi, B. S. (2024). “Factor proportions model for Russian mineral supply-driven global energy transition: Does externality matter?”. *Energy Economics*, 129, 107242. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2023.107242>
- Kilian, L., Rapson, D. y Schipper, B. (2024). *The impact of the 2022 oil embargo and price cap on Russian oil prices* (Research Department Working Paper). Federal Reserve Bank of

- Dallas.
<https://www.dallasfed.org/~media/documents/research/papers/2024/wp2401r1.pdf>
- Labys, W. C. (1973). *Dynamic commodity models: Specification, estimation, and simulation*. Lexington Books.
- Maneejuk, P., Kaewtathip, N. y Yamaka, W. (2024). “The influence of the Ukraine-Russia conflict on renewable and fossil energy price cycles”. *Energy Economics*, 129, 107218.
<https://doi.org/10.1016/j.eneco.2023.107218>
- Mariev, O. y Islam, M. M. (2025). “The impact of financial stress, governance, and geopolitics on Europe’s energy transition mineral trade”. *Energy Economics*, 146, 108523.
<https://doi.org/10.1016/j.eneco.2025.108523>
- Nagurney, A., Besik, D. y Dong, J. (2019). “Tariffs and quotas in world trade: A unified variational inequality framework”. *European Journal of Operational Research*, 275(1), 347–360.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.11.040>
- Nasim, A., Ullah, S. y Hameed, A. (2023). “Energy shocks and bank efficiency in emerging economies”. *Energy Economics*, 126, 107005.
<https://doi.org/10.1016/j.eneco.2023.107005>
- Nepal, R., Deng, Y. y Dong, K. (2025). “Going with the flow: How does global energy value chain adapt to geopolitical risks?”. *Energy Economics*, 144, 108288.
<https://doi.org/10.1016/j.eneco.2025.108288>
- Oglend, A. y Kleppe, T. S. (2025). “Storage scarcity and oil price uncertainty”. *Energy Economics*, 144, 108393. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2025.108393>
- Resource Trade Earth. (2026). *Resource Trade Earth* [Base de datos]. Chatham House.
- Samuelson, P. A. (1952). “Spatial price equilibrium and linear programming”. *The American Economic Review*, 42(3), 283–303.
- Spiro, D., Wachtmeister, H. y Gars, J. (2025). “Assessing the impacts of oil sanctions on Russia”. *Energy Policy*, 206, 114739. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2025.114739>
- Takayama, T. y Judge, G. G. (1971). *Spatial and temporal price and allocation models*. North-Holland Publishing Company.

- U.S. Energy Information Administration. (2026). *International energy statistics: Petroleum and other liquids production and consumption* [Data set]. U.S. Department of Energy. <https://www.eia.gov/international/data/world>
- Zhou, X., Enilov, M. y Parhi, M. (2024). “Does oil spin the commodity wheel? Quantile connectedness with a common factor error structure across energy and agricultural markets”. *Energy Economics*, 132, 107468. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2024.107468>